



Microzonazione sismica di un centro abitato di piccole dimensioni: il caso studio di Sant'Agata Fossili (AL)

Podestà S.¹, Conte R.², Compagnoni M.³, Di Capua G.⁴, Di Giulio G.⁴, Marchetti M.⁴, Milana G.⁴, Parodi S.¹, Passalacqua R.¹, Peppoloni S.⁴, Pergalani F.³, Sapia V.⁴.

¹DICAT – Università di Genova. Via Montallegro 1, 16145 Genova.

²Regione Piemonte-Direzione Opere Pubbliche, Difesa del suolo ed Economia Montana e Foreste, Torino.

³DIS-Politecnico di Milano.

⁴Istituto Nazionale di Geofisica e Vulcanologia, Roma.

Keywords: microzonazione sismica, rischio sismico, scenario di danno.

ABSTRACT

In questo lavoro sono descritte le attività svolte nell'ambito del Progetto Europeo Strategico RISK NAT riguardanti l'analisi di microzonazione di Sant'Agata Fossili (AL). Sono in particolare descritte tutte le indagini ed analisi numeriche condotte al fine di ottenere una microzonazione sismica di livello 3 secondo quanto previsto nelle recenti linee guida nazionali degli. Al fine inoltre di valutare le ricadute di tipo applicativo di una corretta microzonazione sismica del territorio, sono state realizzate delle simulazioni di scenario adottando come riferimento gli spettri di risposta ottenuti dall'analisi di microzonazione. Le valutazioni di scenario ottenute sono state infine confrontate con le previsioni di scenario realizzabili a priori sulla base dell'adozione degli spettri di risposta definiti nelle Norme Tecniche per le Costruzioni.

1 INTRODUZIONE

L'11 aprile 2003 un terremoto di modesta energia ($M_l = 4.7$) colpisce un'area sud-orientale del Piemonte senza provocare vittime, ma determinando danni in numerosi centri abitati.

Questo evento non rappresenta certo un'anomalia nell'ambito della sismicità storica e della pericolosità sismica attesa per questo territorio. Ha però ricordato a tecnici ed amministratori locali che anche il Piemonte deve essere considerato un territorio sismico. Il rischio sismico del Piemonte non è sicuramente paragonabile a quello di altre regioni italiane, pur tuttavia presenta un livello non trascurabile almeno per certe zone. Partendo da queste semplici considerazioni, la Regione Piemonte si è fatta promotrice nell'ambito del Progetto Europeo Strategico RISK NAT della microzonazione sismica di Sant'Agata Fossili (AL). Si tratta del centro abitato che ha subito il danneggiamento maggiore in occasione del terremoto del 2003, raggiungendo un'intensità macrosismica IMCS=VI-VII. In questo modo, la Regione

Piemonte ha avviato per la prima volta un'attività di microzonazione sismica sul suo territorio, in modo da capire anche quale possa essere la migliore finalizzazione di questi studi nell'ambito della programmazione territoriale finalizzata alla mitigazione del rischio sismico.

Rifacendosi alle recenti linee guida degli Indirizzi e Criteri per la Microzonazione Sismica (<http://www.protezionecivile.it/>), la Regione ha dapprima finanziato un progetto su Sant'Agata Fossili per effettuare uno studio di microzonazione sismica di livello 1. Successivamente, con il Progetto RISK NAT ha avviato una fase di approfondimento degli studi di livello 1 al fine di pervenire ad una analisi di risposta sismica locale e alla microzonazione sismica di livello 3. A tal fine, è stato creato un gruppo di ricerca multidisciplinare che ha condotto un'analisi approfondita della geologia locale, ha effettuato un'accurata caratterizzazione geotecnica e geofisica dei litotipi presenti con la redazione di un modello litotecnico del sottosuolo, ha eseguito una modellazione numerica della risposta sismica locale, ha messo a punto un'analisi della vulnerabilità sismica

dell'edificato ed ha analizzato il danneggiamento subito dagli edifici, recuperando le schede AeDES rilevate a seguito del terremoto del 2003. I risultati ottenuti hanno permesso di comprendere le differenze geologiche e geofisiche esistenti nel sottosuolo del centro abitato, che si traducono in differenze della risposta sismica locale quantificabili sia in termini di fattori di amplificazione che di spettri di risposta elastici in accelerazione. Queste differenze consentono da un lato di comprendere in maniera più precisa la distribuzione del danneggiamento osservato, dall'altro di definire livelli di protezione sismica per gli edifici che tengano conto in maniera più accurata i possibili effetti di amplificazione sismica locale, rispetto a quelli ottenibili considerando gli spettri di risposta elastici previsti dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC, 2008). Sulla base dell'adozione degli spettri di risposta ottenuti dallo studio di microzonazione, sono state eseguite delle analisi di scenario a livello territoriale per l'intero centro abitato del comune. Tali valutazioni sono state realizzate sia al fine di valutare la conseguente risposta sismica degli edifici, sia le differenze con le previsioni di scenario realizzabili a priori sulla base dell'adozione degli spettri di risposta definiti nelle NTC.

Il progetto ha avuto infine importanti risvolti metodologici, prevedendo un confronto tra i risultati che è possibile ottenere, in uno stesso sito di indagine, utilizzando tecniche geofisiche differenti (Down-Hole, MASW, Array 2D, Tomografia Elettrica), l'analisi integrata dei risultati geologici, geofisici e geotecnici, per meglio vincolare il modello litotecnico del sottosuolo e, di conseguenza, le inversioni numeriche necessarie all'elaborazione di profili di V_s , nonché la finalizzazione delle attività per la progettazione strutturale.

2 INDAGINI GEOLOGICHE, GEOGNOSTICHE, GEOTECNICHE E GEOFISICHE

L'indagine geologica ha evidenziato la presenza nell'area d'indagine di depositi limoso-argillosi e marnosi; solo localmente sono presenti anche depositi sabbiosi e ghiaiosi. Al fine di investigare il sottosuolo del centro abitato sono stati, innanzitutto, raccolti i dati geognostici disponibili prodotti durante le attività per la microzonazione sismica di livello 1; inoltre sono stati eseguiti due nuovi sondaggi, con prelievo di campioni indisturbati su cui sono state eseguite prove di laboratorio statiche e dinamiche per la

caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni, ed è stata effettuata una campagna di indagini geofisiche. Complessivamente sono stati utilizzati i risultati delle seguenti indagini, la cui ubicazione è riportata in Figura 1: 21 sondaggi geognostici a carotaggio continuo, di cui 19 disponibili e 2 di nuova esecuzione; 2 prove down-hole; 15 misure di rumore ambientale; 1 array 2D passivo; 1 prova MASW; 1 prova di sismica a rifrazione e 4 tomografie elettriche.

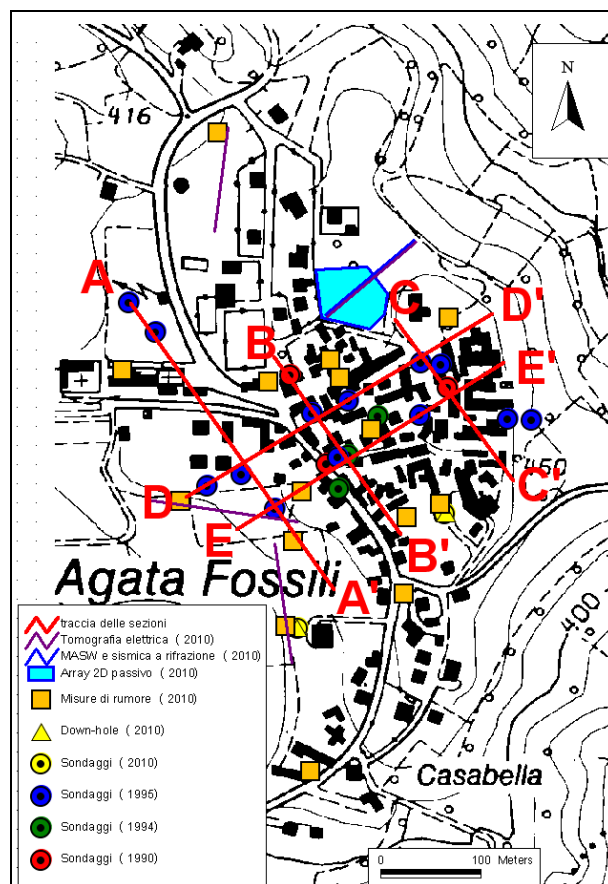


Figura 1. Ubicazione delle indagini geognostiche e geofisiche disponibili e di nuova esecuzione

Lo studio geologico ha messo in evidenza una sequenza stratigrafica pressoché omogenea per tutta l'area esaminata, anche se ovviamente gli spessori relativi dei litotipi presenti nel sottosuolo possono essere differenti. In generale, nei pressi del piano campagna (p.c.) si riconosce uno spessore di terreni di riporto e di depositi eluvio-colluviali recenti, a cui seguono in profondità terreni prevalentemente a grana medio-fine, costituiti da limi, limi argillosi e sabbiosi, sabbie limose. Al di sotto si ritrovano diffusamente marne argillose, localmente più calcaree, che rappresentano il substrato roccioso locale. Soltanto in un'area ristretta, immediatamente a nord del cimitero, si riscontrano importanti spessori di ghiaie eterometriche e di conglomerati

ben cementati, soggiacenti ai terreni di riporto o all'interno dei depositi prevalentemente limosi.

L'elaborazione dei dati raccolti con la campagna di indagini geofisiche hanno permesso di costruire i diversi modelli litotecnici del sottosuolo, di individuare le caratteristiche geofisiche di ogni litotipo (un esempio è riportato in Figura 2), da utilizzare per le analisi numeriche della risposta sismica locale (§3), e di distinguere 4 diversi settori geolitologici (Figura 3). I modelli prevedono la presenza di depositi di copertura superficiali e soffici, posti al di sopra di un substrato più rigido. I primi sono costituiti, a partire dal piano di campagna, da terreni di riporto e/o depositi eluvio-colluviali, cui seguono in profondità depositi prevalentemente limoso-argillosi e, solo localmente, ghiaiosi. Il substrato rigido è invece costituito da marne e, in un'area limitata, da conglomerati.

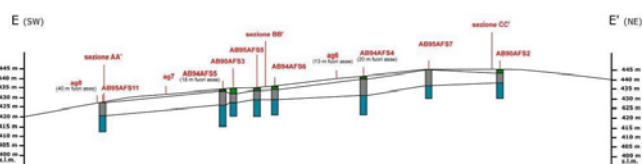


Figura 2. Sezione geolitologica E-E' a partire dal p.c., si osserva lo strato costituito dal terreno di riporto e dai depositi eluvio-colluviali recenti. A questo strato segue il deposito prevalentemente limoso. Ancora più in profondità si incontra il substrato roccioso costituito prevalentemente da marne.

Per quanto riguarda le marne del substrato, i settori 1 e 2 sono caratterizzati da un differente andamento in profondità delle velocità delle onde di taglio (V_s):

- nel settore 2 le marne presenti nel sottosuolo risultano particolarmente compatte, mostrano uno spessore nella porzione superiore del deposito di circa 17 m, con valori di V_s intorno ai 700 m/s ed un peso di volume naturale (γ_n) di 21 kN/m³; più in profondità le marne raggiungono i valori caratteristici del substrato sismico, ovvero $V_s \geq 800$ m/s;

- nel settore 1 sono invece presenti marne meno compatte che mostrano un graduale aumento dei valori di V_s con la profondità e valori del peso di volume variabili da 20 a 21 kN/m³. I valori di V_s , caratteristici di un substrato sismico, sono raggiunti intorno ai 30 m dal p.c.

Nell'area posta a nord-ovest del centro abitato, è presente il settore 3, nel quale il substrato rigido non è costituito da marne, bensì da conglomerati caratterizzati da valori di V_s intorno ai 600 m/s e con γ_n di circa 21 kN/m³, al di sopra dei quali sono presenti depositi ghiaiosi compatti per uno

spessore di circa 3 m; localmente, al di sopra dei depositi ghiaiosi compatti, è presente uno strato di sedimenti limoso-argillosi a spessore variabile, che presenta comportamento analogo a quello delle sequenze limo-argillose presenti nel settore 2, che sovrastano il substrato marnoso.



Figura 3. Settori geolitologici individuati nel centro abitato. Per le caratteristiche di ciascun settore in termini di spessori del deposito di copertura, V_s , γ_n , H/V , si rimanda al testo.

Il deposito limoso-argilloso posto al di sopra delle marne e, solo localmente, a ricoprire i depositi ghiaiosi compatti e i conglomerati, presenta caratteristiche leggermente diverse tra i 3 settori citati:

- nel settore 2 e, ove presente, nel settore 3, mostra valori di V_s di 200 m/s e γ_n di 19,00 kN/m³; inoltre, in questo settore si nota un marcato contrasto di V_s , tra i depositi di copertura ed il substrato rigido, evidenziato anche dalle curve H/V che presentano picchi di amplificazione ben definiti e pronunciati, con frequenze predominanti comprese tra 2 e 7 Hz (Figura 4);

- nel settore 1 invece presenta valori di V_s di 250 m/s e γ_n di 20 kN/m³; qui le curve H/V evidenziano picchi di amplificazione poco pronunciati, per lo più spostati sulle alte frequenze (> 10 Hz) o, in alcuni casi, spettri piatti e quindi frequenze predominanti poco evidenti nell'intervallo 0-20 Hz (Figura 4).

3 VALUTAZIONE DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

Al fine di effettuare la modellazione numerica della risposta sismica locale, si è reso necessario disporre di accelerogrammi e spettri di risposta in accelerazione, da utilizzare come input sismici nella modellazione stessa. In questo progetto sono stati utilizzati accelerogrammi registrati opportunamente selezionati. A tal fine, sono stati utilizzati i risultati ottenuti dal GdL MPS (2004), che ha messo a punto la mappa di pericolosità sismica del territorio italiano. In particolare, sono stati considerati i valori di accelerazione massima attesa (a_{max}) al substrato rigido, calcolati su una griglia regolare di passo $0,05^\circ$, e i valori delle ordinate spettrali degli spettri di risposta in accelerazione a pericolosità uniforme, per un tempo di ritorno pari a 475 anni; questo valore è convenzionalmente utilizzato per quantificare la pericolosità sismica a fini normativi e per eseguire studi di risposta sismica locale. I 5 accelerogrammi naturali, utilizzati come input per simulare lo scuotimento sismico, sono stati selezionati dalla banca dati ITACA (WG ITACA, 2006), secondo le modalità previste dalle NTC 2008, ovvero tenendo conto delle caratteristiche sismotettoniche dell'area, delle magnitudo massime possibili e dei livelli di accelerazione orizzontale attesi al substrato rigido.

La metodologia adottata per la valutazione della risposta sismica locale dell'area in esame ha previsto: la scelta dei codici di calcolo da utilizzare, l'esecuzione di modellazioni numeriche finalizzate alla valutazione delle amplificazioni attese in termini di spettri di risposta elastici in accelerazione e fattori di amplificazione, la redazione della carta di microzonazione sismica di livello 3 (GdL MS, 2008).

Le analisi numeriche sono state effettuate utilizzando il codice di calcolo monodimensionale (1D) SHAKE91 (Idriss & Sun, 1992), applicabile in presenza di strati piano paralleli. In relazione alle caratteristiche geologiche e geomorfologiche dell'area in esame, caratterizzata da un andamento degli strati più superficiali riconducibile allo schema degli strati piano-paralleli (come evidenziato dalle indagini geognostiche e geofisiche) e da una topografia assimilabile ad una cresta, le analisi numeriche condotte con il codice di calcolo 1D per lo studio dei fenomeni di amplificazione litostratigrafica sono state integrate da analisi numeriche bidimensionali (2D), eseguite con il software ELCO (Calliero et al., 2000), al fine di

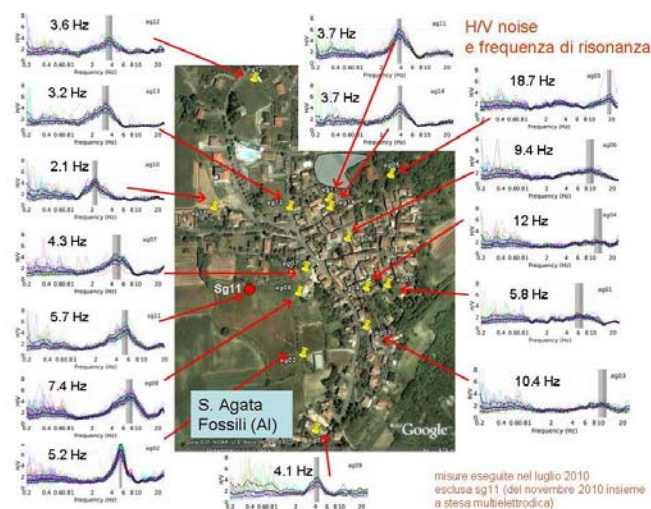


Figura 4. Ubicazione delle misure di rumore sismico. Sono riportate anche le curve H/V e le frequenze caratteristiche di risonanza. Il poligono grigio nella parte nord del paese indica l'area dove sono state effettuate misure passive in configurazione array.

Infine, le curve dell'andamento del modulo di taglio normalizzato (G/G_0) e del rapporto di smorzamento (D) con la deformazione tangenziale (γ), sono state ottenute dai risultati su provini a Colonna Risonante, ricavati dai campioni indisturbati prelevati nei fori di sondaggio di nuova esecuzione dagli orizzonti prevalentemente limoso-argillosi. Le curve sono differenziate in funzione delle profondità di prelievo dei campioni di terreno. I risultati ottenuti dal campione limoso-argilloso prelevato a maggiore profondità dal p.c. (9,0-9,5 m) sono stati attribuiti anche al substrato marnoso. Le curve G/G_0 e D per il deposito ghiaioso sono state invece opportunamente selezionate dalla letteratura scientifica.

Nella Figura 3 è possibile individuare anche il settore 4 che è occupato interamente da una frana stabilizzata. L'area di ubicazione e lo spessore del corpo franoso sono stati studiati attraverso i contrasti di resistività tra il terreno mobilizzato e quello integro, mediante indagini di tomografia elettrica (Figura 5).

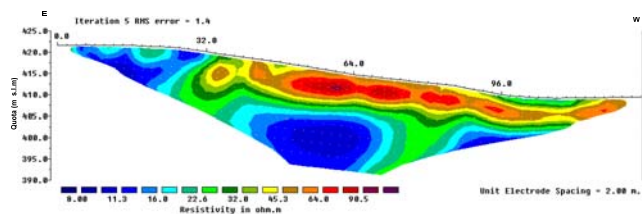


Figura 5. Tomografia elettrica: valori di resistività elaborati per lo stendimento eseguito longitudinalmente al corpo di frana. È evidente il contrasto di resistività tra i valori ottenuti per il corpo di frana, che si attestano in un intervallo di 50-80 Ohm.m, e quelli dei terreni sottostanti, integri, che mostrano, viceversa, resistività inferiori ai 40 Ohm.m. Lo spessore dello strato superficiale, più resistivo, è di 8-10 m

considerare anche i fenomeni di amplificazione topografica.

Sulla base di tutti i dati geologici, geotecnici e geofisici disponibili e delle 5 sezioni geolitologiche predisposte (Figura 1 e Figura 2), sono state messe a punto 18 colonne litostratigrafiche rappresentative dell'area esaminata (Figura 6), ognuna delle quali prevede la presenza del deposito di copertura soffice, di spessore variabile, poggiante sul substrato rigido. La risposta sismica locale in superficie è stata analizzata per ciascuna colonna litostratigrafica, applicando il codice di calcolo SHAKE91 ed impiegando i 5 accelerogrammi naturali citati come input sismico; i risultati ottenuti sono espressi come media delle 5 analisi eseguite in termini di spettri di risposta elastici in accelerazione al 5% dello smorzamento critico e in termini di fattori di amplificazione $F_{a0.1-0.5}$ e $F_{a0.5-1.5}$, calcolati sugli spettri di risposta elastici in accelerazione come rapporto tra gli integrali di output e di input negli intervalli di periodo compresi tra 0,1-0,5 s e 0,5-1,5 s (Housner, 1952). Gli spettri di risposta medi ottenuti sono stati confrontati con lo spettro di risposta previsto dalla normativa sismica (NTC, 2008), corrispondente alla categoria di sottosuolo a cui appartiene la colonna stratigrafica analizzata (valutata attraverso la descrizione stratigrafica ed il valore del parametro V_{s30}). Per poter effettuare questo confronto, gli spettri di risposta calcolati sono stati adattati alla forma definita dalla normativa ("lisciatura" secondo la procedura prevista dal GdL MS 2008), che prevede 3 diversi tratti di curva rispettivamente ad accelerazione, velocità e spostamento costante.

Per quanto riguarda la presenza della cresta morfologica è stato ricostruito un profilo topografico, passante per il centro abitato e per la sommità del rilievo, che presenta una larghezza (L) alla base di 1.700 m e un dislivello massimo (H) di 170 m. La forma morfologica può essere classificata come una cresta appuntita (rapporto H/L pari a 0,1). Nell'analisi numerica 2D è stato considerato un sottosuolo costituito da un materiale omogeneo, isotropo ed elastico al quale è stato arbitrariamente assegnato un valore di V_s di 800 m/s ed un γ_n di 22 kN/m³. In termini di spettri di risposta medi e di fattori di amplificazione medi è emerso un effetto topografico trascurabile, riconducibile al basso rapporto H/L del rilievo esaminato.

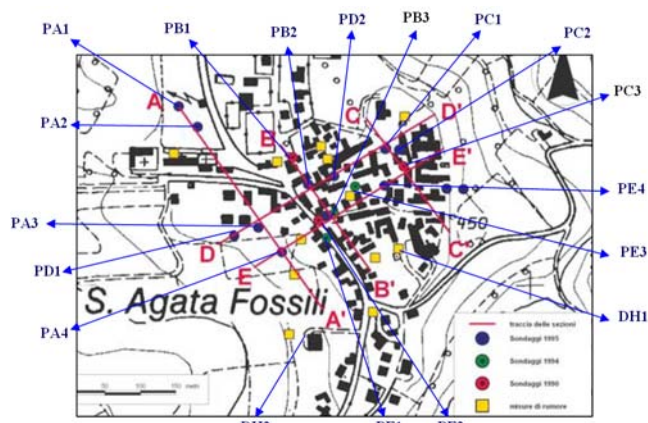


Figura 6. Ubicazione delle 18 colonne litostratigrafiche utilizzate per le analisi di risposta sismica locale 1D

4 MICROZONAZIONE SISMICA DI LIVELLO 3

Sulla base dei risultati delle modellazioni numeriche della risposta sismica locale, è stata redatta la carta di microzonazione sismica di livello 3 (Figura 7), ove il centro abitato è suddiviso in 4 domini, corrispondenti ai 4 settori geolitologici (dominio *est* = settore 1; dominio *ovest* = settore 2; dominio *nord-ovest* = settore 3; dominio *frana* = settore 4). Per ciascun dominio sono stati indicati gli spettri di risposta medi e i relativi fattori di amplificazione. Tra i diversi domini si notano piccole differenze nelle forme spettrali e diversi valori spettrali massimi. In generale, la variabilità degli spettri tra i domini considerati può essere ritenuta trascurabile, ad esclusione del dominio nord-ovest nel quale non si manifestano fenomeni di amplificazione sismica, quando nel sottosuolo sono presenti depositi ghiaiosi compatti. In Figura 7 sono anche riportati i valori dei fattori di amplificazione medi ($F_{a0.1-0.5}$ ed $F_{a0.5-1.5}$), associati a ciascun dominio. In questo caso, la variabilità dei fattori tra i vari domini è sempre poco evidente, in modo particolare se si considerano i valori di $F_{a0.1-0.5}$ (seconda riga nei riquadri gialli). Anche in questo caso, nel dominio nord-ovest e in presenza dei depositi ghiaiosi compatti, i fattori di amplificazione risultano pari ad 1 (assenza di fenomeni di amplificazione sismica).

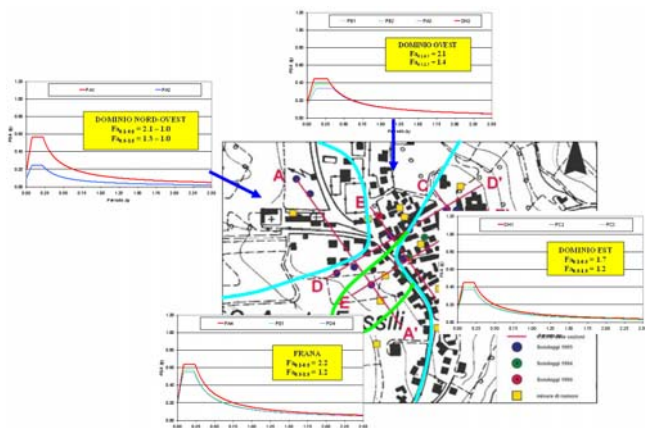


Figura 7. Carta di microzonazione sismica di livello 3 di Sant'Agata Fossili (AL).

5 ANALISI DI RISCHIO SISMICO DEL CENTRO ABITATO

Uno studio di microzonazione sismica, permette di ottenere un'accurata valutazione della pericolosità sismica locale del sito e, conseguentemente, di valutare in modo puntuale la risposta degli elementi esposti. Proprio al fine di esemplificare le ricadute di tipo applicativo, gli spettri di risposta ottenuti dalla microzonazione di livello 3 sono stati adottati come riferimento, per la realizzazione dello scenario di danno esteso all'intero centro abitato di Sant'Agata Fossili.

Una valutazione di scenario richiede, innanzitutto, una caratterizzazione degli elementi esposti e una valutazione della loro vulnerabilità nei confronti dell'azione sismica. Per tale motivo, è necessario riferirsi a modelli di vulnerabilità idonei a stabilire una corretta relazione tra la pericolosità sismica e il conseguente danno strutturale. Nel caso in esame, la vulnerabilità sismica del costruito presente nell'area d'indagine è stata valutata adottando modelli semplificati, basati su un approccio di tipo meccanico. Nello specifico, sono stati adottati i modelli proposti da Lagomarsino et al., 2010 e sviluppati nell'ambito del Progetto S2 finanziato dall'INGV ed dal Dipartimento di Protezione Civile ("Development of a dynamical model for seismic hazard assessment at national scale" (coordinatori: Ezio Faccioli e Warner Marzocchi, convenzione INGV-DPC 2007-2009). Essi consentono di descrivere la risposta delle strutture al crescere dell'intensità dell'input sismico, attraverso la definizione di curve di capacità che rappresentano l'evoluzione della risposta in campo non lineare. Ciascun punto della curva di capacità è di conseguenza associato ad un determinato livello

di danno. I modelli adottati, consentono in particolare di definire tali curve sulla base di pochi parametri geometrici e meccanici, quali: il numero di piani, la resistenza dei materiali, la capacità di spostamento, il meccanismo di collasso ipotizzato, ecc (Lagomarsino et al., 2010). In Figura 8 si riportano, a titolo di esempio, le curve di capacità ottenute per gli edifici in muratura di Sant'Agata Fossili, caratterizzati da un'epoca di costruzione compresa tra il 1919 e il 1945. Le curve riportate in Figura 8 sono riferite alla modalità di collasso uniforme, con numero di piani N variabile tra 2 e 4.

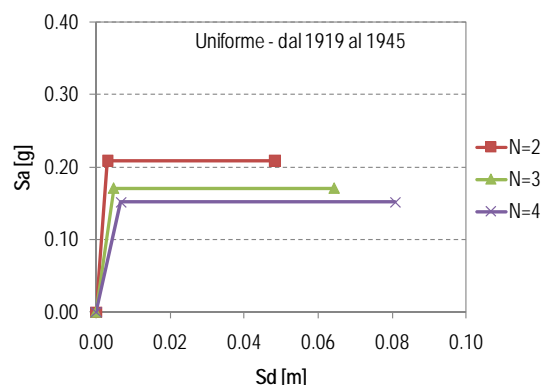


Figura 8. Esempio di curve di capacità edifici in muratura Sant'Agata Fossili (AL).

Dal confronto con la domanda sismica, espressa in termini di spettro di risposta, attraverso l'applicazione della procedura statica non lineare *N2 Method* (Fajfar, 2000), è stata di conseguenza valutata la risposta sismica degli elementi esposti attraverso l'individuazione del cosiddetto *performance point*. Definiti inoltre sulla curva di capacità degli opportuni stati limite di danno, corrispondenti a determinate soglie di spostamento, è stato valutato il livello di danno e la corrispondente distribuzione. Il *performance point* rappresenta, infatti, una stima media della risposta della struttura. La conseguente stima del danneggiamento occorso, risultante dal confronto con gli stati limite di danno, dipende dall'incertezza associata alla definizione delle curve di capacità, agli stati limite e alla definizione dell'input sismico. In accordo con l'approccio proposto da HAZUS (1999) l'incertezza nella valutazione del livello di danno è rappresentata tramite la definizione di curve di fragilità log-normali, in funzione dello spostamento al *performance point* e dei valori medi degli spostamenti associati ai diversi stati limite.

Al fine di inquadrare uno scenario complessivo per l'intero centro abitato di San'Agata Fossili, i modelli meccanici sono applicati a classi omogenee di edifici, rappresentativi delle tipologie presenti nel suo centro abitato. Le valutazioni sono state effettuate, separatamente, per ciascuna delle quattro zone in cui è stato suddiviso il territorio comunale nella definizione della pericolosità sismica locale. Lo scenario di danno così individuato è stato poi confrontato con la previsione realizzabile sulla base dell'adozione degli spettri di pericolosità indicati dalle Norme Tecniche per le Costruzioni (NTC – D.M. 14 gennaio 2008).

5.1 Scenario di danno per i quattro domini di analisi

Per realizzare le valutazioni di scenario di seguito riportate, si sono adottati gli spettri di risposta ottenuti dall'analisi di microzonazione. La risposta sismica locale è stata in particolare valutata in corrispondenza di ciascuna colonna stratigrafica individuando, inoltre, quattro domini con una diversa caratterizzazione geolitologica del sottosuolo. Si è scelto di riferirsi ai quattro domini di analisi adottando, come riferimento per ciascuno di essi, uno spettro di risposta medio ricavato sulla base delle simulazioni realizzate per le singole colonne stratigrafiche. In Figura 9 sono riportati gli spettri adottati per i quattro domini di analisi.

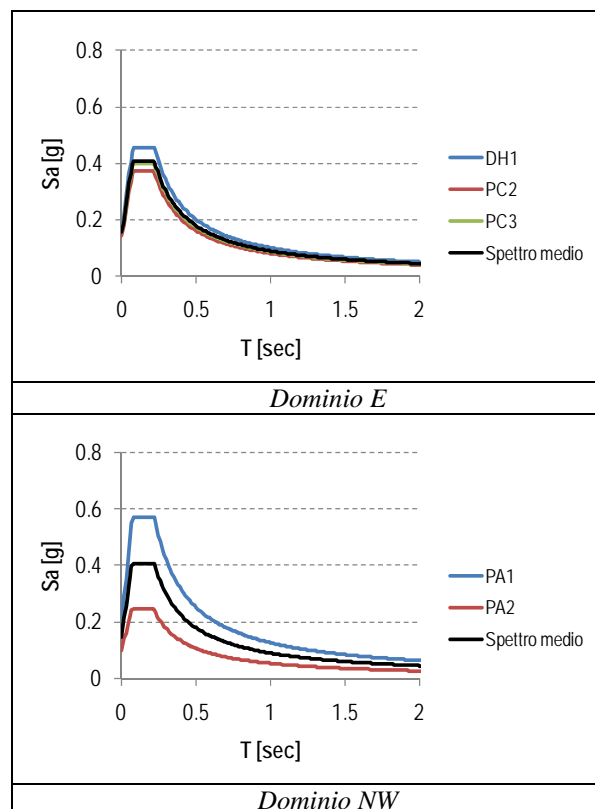
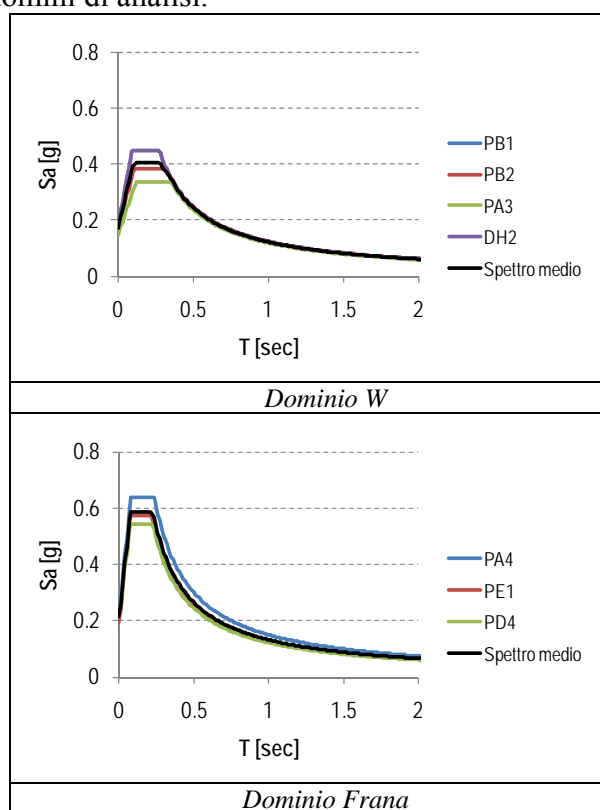
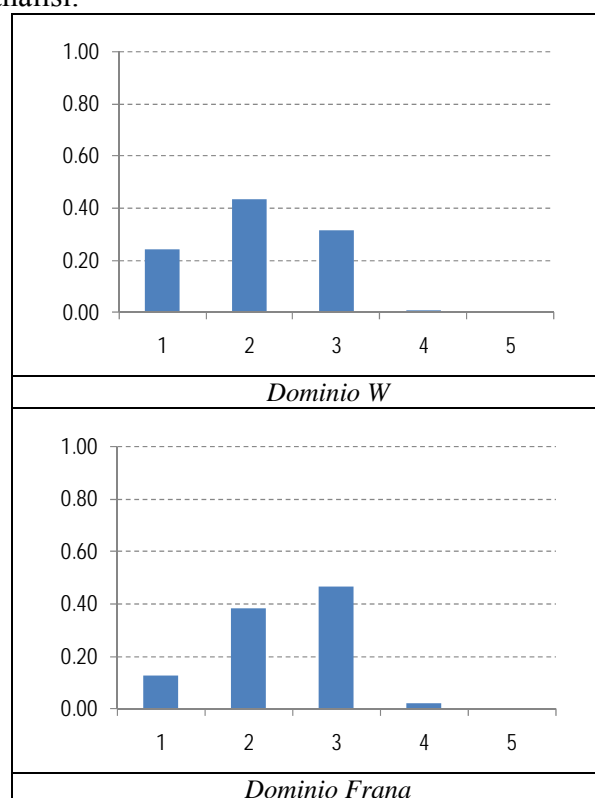


Figura 9. Spettri di risposta per i quattro domini di analisi

Di seguito (Figura 10) si riporta lo scenario di danno, calcolato con riferimento a ciascuno dei quattro domini ottenuti applicando la procedura descritta. Le distribuzioni di danno sono state, in primo luogo, valutate singolarmente per ciascuna classe omogenea di edifici, successivamente combinate al fine di ottenere un'unica distribuzione di danno per ciascun dominio di analisi.



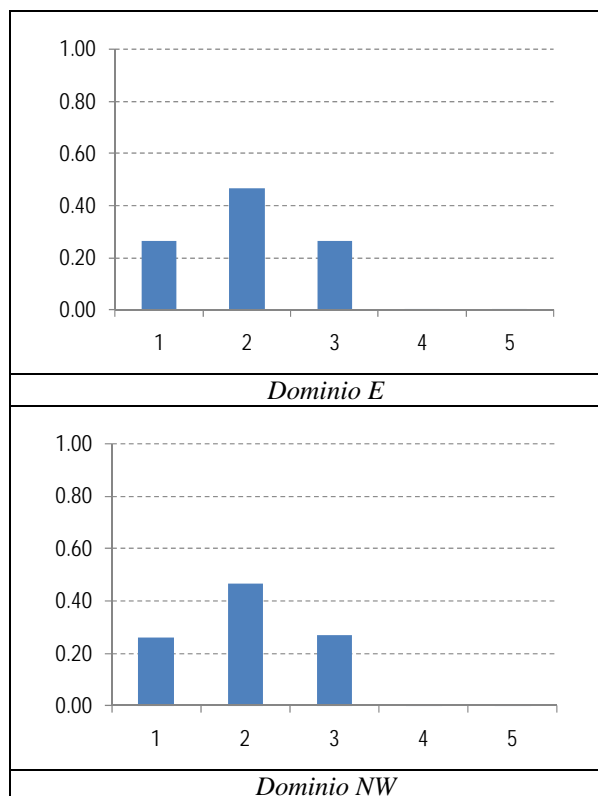


Figura 10. Scenario di danno ottenuto per i quattro domini di analisi

5.2 Scenario di danno ottenuto dall'applicazione dello spettro delle NTC

Un'applicazione analoga a quella presentata nel § 5.1 è stata realizzata assumendo come riferimento gli spettri di normativa (NTC – D.M. 14 Gennaio 2008), valutati con riferimento alle coordinate geografiche del sito e per un periodo di ritorno di 475 anni. Si sono in particolare realizzate due valutazioni di scenario, ottenute dall'adozione di due diverse categorie di sottosuolo: B e C. Le indagini condotte hanno, infatti, messo in luce una diversa classificazione del sottosuolo (valutata sulla base della $V_{s,30}$) in corrispondenza delle colonne stratigrafiche analizzate. In Figura 10 è riportato il confronto tra gli spettri di risposta ottenuti dalla valutazione della risposta sismica locale e gli spettri di normativa. Si può osservare come gli spettri derivanti dall'analisi di microzonazione abbiano dei valori di accelerazione massima sempre maggiori di quelli di normativa.

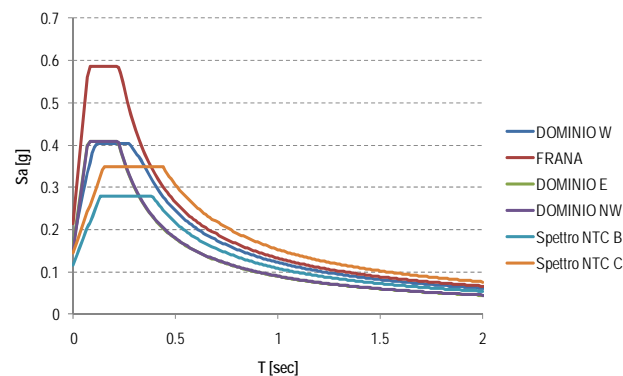


Figura 10. Confronto tra gli spettri di risposta medi dei quattro domini e gli spettri delle NTC valutati con suolo B e C per un periodo di ritorno T_r di 475 anni.

In Figura 11 sono rappresentati gli scenari di danno, ottenuti considerando lo spettro NTC rispettivamente con un suolo di tipo B e di tipo C.

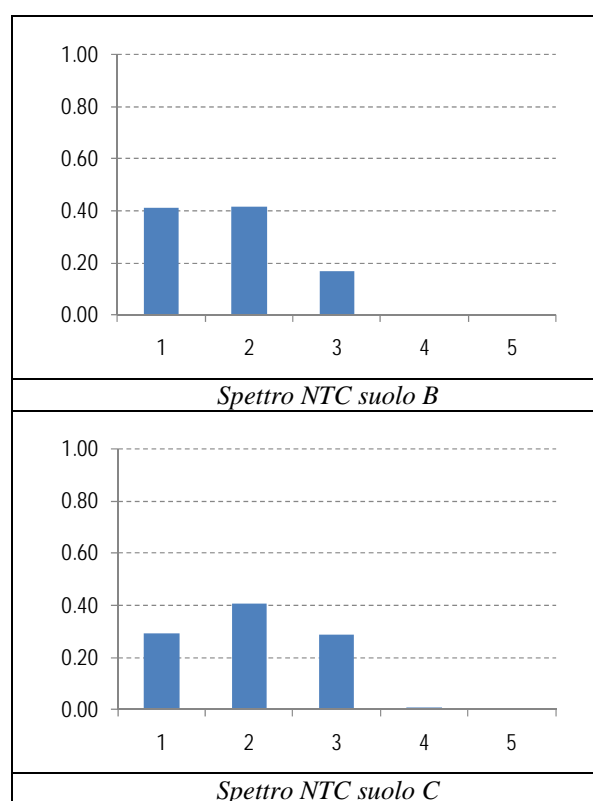


Figura 11. Scenario di danno ottenuto adottando gli spettri NTC

Se si confrontano le distribuzioni di danno complessive, si rileva come l'adozione degli spettri ottenuti dall'analisi di microzonazione porta alla valutazione di scenari di danno maggiormente punitivi (Figura 12).

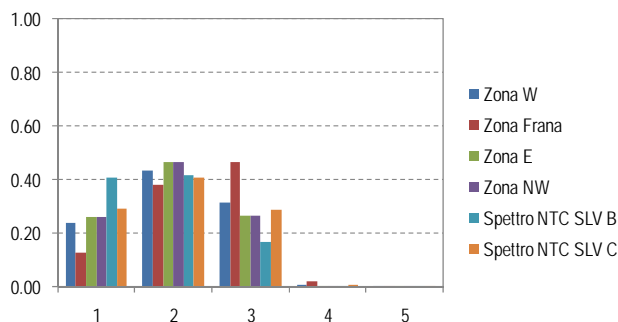


Figura 12. Confronto tra gli scenari di danno

La differenza maggiore si rileva con lo spettro ottenuto per il dominio *Frana*, che è quello che presenta i valori di accelerazione massimi. Questo tipo di risultato è legato non solo alla forma dello spettro ma anche alla tipologia di edifici presenti nell'area analizzata, la cui quasi totalità è in muratura e con numero di piani limitato (la somma degli edifici con un numero di piani 1 e 2 rappresenta il 75% del campione analizzato). Questo tipo di edifici sono caratterizzati da un comportamento di tipo rigido e l'intersezione con gli spettri di risposta si ottiene, sempre, in corrispondenza del tratto di spettro ad accelerazione costante per gli edifici ad un piano.

6 CONCLUSIONI

I risultati ottenuti per la microzonazione sismica di Sant'Agata Fossili (AL) possono essere utilizzati con diverse finalità. I valori dei fattori di amplificazione calcolati forniscono una graduatoria di pericolosità sismica per le diverse porzioni in cui è stato suddiviso il centro abitato, sulla base dello studio geologico, delle indagini geofisiche e delle analisi numeriche e sperimentali. Pertanto, questi valori possono essere utilizzati a fini urbanistici, per identificare le aree prioritarie per gli interventi di mitigazione e quelle più idonee per le nuove espansioni. Gli spettri di risposta elastici in accelerazione possono essere utilizzati direttamente in fase di progettazione, sia per i nuovi edifici, sia per la valutazione della sicurezza degli edifici esistenti.

Da questo studio emerge ancora una volta, con chiarezza, che nei contesti urbani gli studi di microzonazione sismica sono possibili e offrono un valido strumento di conoscenza del territorio, utilizzabili anche per la salvaguardia dei beni storico-artistici, previa la conoscenza della vulnerabilità sismica di quest'ultimi. Infatti, una valutazione più realistica degli scuotimenti possibili per effetto dei fenomeni di amplificazione sismica litostratigrafica e

topografica è necessaria, per effettuare interventi di messa in sicurezza e/o di riduzione del rischio sismico che consentano una migliore difesa dai terremoti.

BIBLIOGRAFIA

- Callerio A., Petrini V., Pergalani F. (2000) - *ELCO, A program for two-dimensional analyses using boundary element method*. Rapporto Tecnico, IRRS, Milano.
- Cattari S., Lagomarsino S., Parodi S. (2009). Formulazione di un modello meccanico per l'analisi di vulnerabilità sismica del costruito in muratura. Proceeding of XII Congresso Nazionale "L'Ingegneria Sismica in Italia", Bologna.
- Fajfar P. (2000). "A non linear analysis method for performance-based seismic design", *Earthquake Spectra*, 16,3: pp.573-591.
- GdL MS (2008). *Indirizzi e criteri per la microzonazione sismica*. Conferenza delle Regioni e delle Province autonome – Dipartimento della Protezione Civile, Roma, 3 vol. e DVD.
- GdL CPTI (2004) - *Catalogo Parametrico dei Terremoti Italiani, versione 2004 (CPTI04)*. INGV, Bologna, <http://emidius.mi.ingv.it/CPTI04/index.html>.
- HAZUS (1999). "Earthquake Loss Estimation Methodology - Technical and User Manuals". Federal Emergency Management Agency, Washington, D.C.
- Housner G.W. (1952) - *Spectral Intensities of strong motion earthquakes, Proc. of the Symposium on Earthquakes and Blast Effects on Structures*. Earthquake Engineering Research Institute, Oakland, California.
- Idriss I.M., Sun J.I. (1992) - *User's manual for SHAKE91, A computer program for conducting equivalent linear seismic response analyses of horizontally layered soil deposits*. Report of Dip. of Civil & Environmental Eng., University of California, Davis.
- Lagomarsino S., Cattari S., Pagnini L.C. e Parodi S. (2010). Project S2: Development of a dynamical model for seismic hazard assessment at national scale. Method(s) for large scale damage assessment, including independent verification of their effectiveness and uncertainty estimation. Agreement INGVDPC 2007-2009, research report.
- Norme Tecniche per le Costruzioni, Decreto Ministero delle Infrastrutture, 14 gennaio 2008, G.U. n. 29 del 4 febbraio 2008 - Suppl. Ordinario n. 30.
- Pagnini L., Vicente R., Lagomarsino S., Varum H. (2008). "A Mechanical method for the vulnerability assessment of masonry buildings", *Proceedings of 14th World Conference Earthquake Engineering*, Beijing (China), October 12-17 2008.
- WG ITACA (2010) - Data Base of the Italian strong motion records: <http://itaca.mi.ingv.it>.